

MMC 功率接口稳定性分析及改进措施

李国庆¹,谷怀广¹,吴学光²,刘 栋²

(1. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012;

2. 国网智能电网研究院 直流输电技术研究所,北京 102211)

摘要: 为了解决模块化多电平换流器(MMC)数模混合仿真功率接口稳定性问题,根据 Routh 判据推导出了基于电压型理想变压器算法功率连接技术的数模混合仿真系统接口稳定的必要条件。针对由功率放大器接口设备带来的系统延时,提出了一种延时补偿技术。对工作于 STATCOM 模式下的 MMC 进行等效建模,并在 PSCAD 仿真软件中实现了基于电压型理想变压器算法的 401 电平 MMC 数模混合仿真。仿真结果表明了 Routh 判据用于数模混合仿真功率接口稳定条件的正确性以及延时补偿技术的有效性。

关键词: MMC; 混合仿真; 接口算法; Routh 判据; 延时补偿; 稳定性

中图分类号: TM 74;TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.02.002

0 引言

数模混合仿真功率连接技术可以精确模拟由开关时间为纳秒-微秒级电力电子器件构成的柔性直流输电换流阀动态特性,逐渐成为了针对模块化多电平换流器 MMC(Modular Multilevel Converter)开展仿真研究的重要手段。但是由功率接口设备引起的系统延时对数模混合仿真系统稳定性带来的影响,成为了当下亟需解决的难题。

国内外很多学者针对数模混合仿真相关基础理论做了一些具体的研究^[1-5]。文献[6]采用基于输电线贝杰龙模型的功率连接接口技术实现数模混合仿真,该算法需要实时采集历史电压源和历史电流源的值,缺点是需要在物理侧增加电阻,电阻参数与线路有关,实现不够灵活,在大功率场合该电阻还会消耗大量能量^[7],并且在基于 MMC 的数模混合仿真中物理动模侧采集历史数据实施起来较为困难。

通过补偿接口延时可以有效改善系统稳定性。文献[8]针对接口中的直流偏移现象提出了一种直流控制环,通过采取延时补偿解决由延时带来的稳定性问题,但未得出满足系统稳定的一般性条件,且该方法对于 MMC 动模的数模混合仿真而言适用性不强。因此,针对 MMC 动模的数模混合仿真接口稳定问题,有待进一步深入研究。

本文针对数模混合仿真实常用接口算法、系统延时补偿技术、满足电压型理想变压器 ITM(Ideal Transformer Model)算法解耦线性负载数模混合仿

真接口稳定的必要条件等做了详细的分析和研究,并利用电磁暂态仿真软件 PSCAD 对所研究内容进行了离线仿真验证,为顺利开展数模混合仿真联合调试奠定了理论基础。

1 数模混合仿真接口算法

1.1 数模混合仿真

数模混合仿真是利用功率放大器、A/D 和 D/A 传感器等接口设备将数字侧和物理侧相结合的一种功率硬件在环 PHIL(Power Hardware-In-the-Loop)仿真,其有功功率和无功功率可以实现双向传输。数模混合仿真的一般结构如图 1 所示。

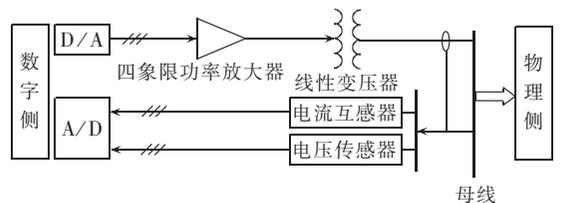


图 1 数模混合仿真的功率硬件接口示意图
Fig.1 Schematic diagram of power interface hardware for digital-analog hybrid simulation

PHIL 仿真不仅可以灵活、方便地更改参数设置,具有通用性强和模拟规模大等特点,同时概念清晰,可以精确直观地模拟复杂非线性物理现象,可以对很多含电力电子器件的、控制复杂度较高的物理设备进行灵活仿真,在电力系统及其他各领域均得到了广泛的应用^[9-11]。

1.2 接口算法

接口算法作为数模混合仿真研究中很关键的一个环节,其主要作用是利用数学推导将 PHIL 仿真数字侧、物理侧两部分建立联系,即二者之间如何相互表示^[12-14]。对于不同的接口算法,PHIL 仿真功率接口的稳定性、精确性和整体实施难易程度均

收稿日期:2015-03-17;修回日期:2015-12-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377016);国家电网公司“千人计划”专项支持项目(SGRIPGKJ[2013]496)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377016) and “Thousand Person Plan” of State Grid Corporation of China(SGRIPGKJ[2013]496)

不同。

目前常用的数模混合仿真接口算法有传输线路 TLM (Transmission Line Model) 算法和 ITM 算法 2 种。其中 TLM 算法是利用线路元件进行解耦, 根据分布参数线路波过程理论推导实现接口运算, 可以借用行波延时精确补偿系统延时。但该算法对于换流母线上存在多条线路接入系统需要分别解耦运算, 占用硬件资源; 另外 MMC-HVDC 系统没有可利用电容元件供虚拟线路补偿延时, 故实现起来较为困难。ITM 算法是实现功率连接最简便直接的一种接口算法, 基于放大信号的类型不同又分为电压型 ITM 算法和电流型 ITM 算法。通常当数字侧阻抗 Z_1 大于物理侧阻抗 Z_2 时, 选择电压型 ITM 算法, 反之选择电流型 ITM 算法^[15]。考虑到 MMC 接入电力系统的实际情况, 本文只针对电压型 ITM 算法展开研究。

电压型 ITM 算法功率连接技术整体上由前向通道和反馈通道构成。数字侧电压信号经过 D/A 转换和功放接口设备放大后送往物理侧受控电压源为前向通道, 物理侧电流信号经过 A/D 转换后送往数字侧受控电流源为反馈通道, 其基本原理如图 2 所示。其中, U_s 为数字侧交流系统理想电压源; R_1, L_1 为数字侧等效阻抗; R_2, L_2 为物理侧等效阻抗; C_2 为物理侧等效电容; U_1, I_1, U_2, I_2 分别为解耦后数字侧和物理侧的端口电压和回路电流。

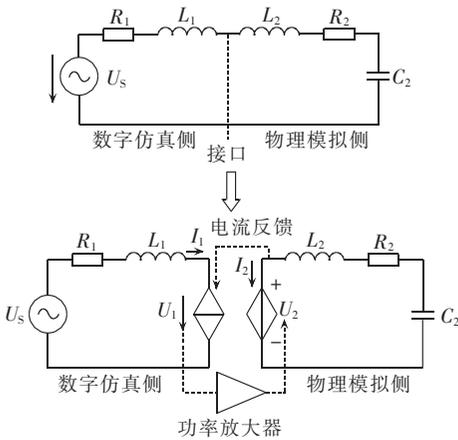


图 2 电压型 ITM 算法接口模型等效电路
Fig.2 Equivalent circuit of interface model based on voltage-type ITM algorithm

2 接口稳定性分析

2.1 Routh 判据接口稳定性分析

设前向通道和反馈通道延时分别为 T_{d1} 和 T_{d2} , 由图 2 可得数模混合 PHIL 仿真电路控制框图如图 3 所示。

图 3 中, $Z_1(s)$ 和 $Z_2(s)$ 分别为数字仿真侧和物理模拟侧阻抗的拉氏变换表示形式, 见式(1)。

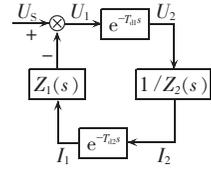


图 3 PHIL 仿真电路控制框图

Fig.3 Block diagram of PHIL simulation circuit control

$$\begin{cases} Z_1(s) = R_1 + L_1 s \\ Z_2(s) = R_2 + L_2 s + \frac{1}{C_2 s} \end{cases} \quad (1)$$

从而可以得到系统开环传递函数见式(2), 其中系统的总延时 $T_d = T_{d1} + T_{d2}$ 。

$$G_0(s) = \frac{Z_1(s)}{Z_2(s)} e^{-T_d s} \quad (2)$$

为了简化分析, 这里利用一阶 Pade 近似原理对 $e^{-T_d s}$ 进行近似处理:

$$e^{-T_d s} \approx \frac{1 - T_d s / 2}{1 + T_d s / 2} = \frac{a - s}{a + s} \quad a > 0 \quad (3)$$

其中, $a = 2/T_d$ 是由延时 T_d 决定的一个变量, 延时越大, 相应的 a 值就越小。

结合式(1) — (3), 利用 Routh 判据可得满足该系统稳定的条件为:

$$\begin{cases} L_2 > L_1 \\ a > \frac{R_1 - R_2}{L_1 + L_2} \\ a^2(R_1 + R_2)(L_1 + L_2)C_2 + a(2L_1 + R_2^2 C_2 - R_1^2 C_2) + (R_2 - R_1) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

从而可知数模混合仿真阻抗分布和系统延时直接决定功率接口稳定性, 即系统接口稳定的必要条件满足以下结论: 物理侧电感 L_2 比数字侧电感 L_1 大, 系统稳定; 系统总延时 T_d 越小, 系统越稳定。

2.2 接口延时补偿技术

功率接口设备的引入, 导致数模混合仿真系统存在一定的延时, 从而影响系统稳定性^[16-17]。为了消除由系统延时对接口稳定性带来的影响, 本文采用在数字侧反馈通道末端加入一个幅值、相位均可控的补偿环节, 通过选择和调整补偿环节参数增益系数 G 、超前和滞后时间因子 T_1 和 T_2 , 从而实现了对系统信号的幅值和相位补偿。在图 3 基础上加入延时补偿环节后的系统控制框图如图 4 所示。

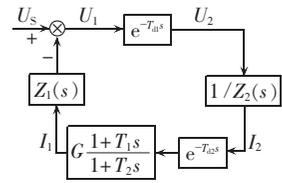


图 4 带延时补偿的 PHIL 仿真电路控制框图

Fig.4 Block diagram of PHIL simulation circuit control with time-delay compensation

3 MMC 等效建模

3.1 含 MMC 的数模混合仿真系统

为了验证上述 Routh 判据稳定性分析得出结论的正确性和合理性,本文以千兆瓦级大连跨海柔性直流输电科技示范工程为例进行等效建模,并在给定实际参数下实现了仿真验证。由于双端 MMC-HVDC 是由 2 个网络拓扑、性能参数完全相同的单端换流站构成的,且单端整体架构等同于一个无功可调的 STATCOM,而 MMC 数模混合仿真功率接口的稳定性只取决于系统的拓扑结构参数,与系统输入输出及有无功率传输无关,且工作于 HVDC 模式下的 MMC 类似于双端 STATCOM,因此本节只针对工作于 STATCOM 模式下的单端 MMC 进行等效建模并在后续展开 PSCAD 仿真验证。

图 5 所示为含 MMC 的交直流数模混合仿真系统部分示意图。其中交流电网在全数字实时仿真设备中等效模拟,功率放大器、换流变压器和 MMC 换流阀等作为物理侧,用实际的物理设备进行模拟,并遵从一定的模拟比来完成^[18]。

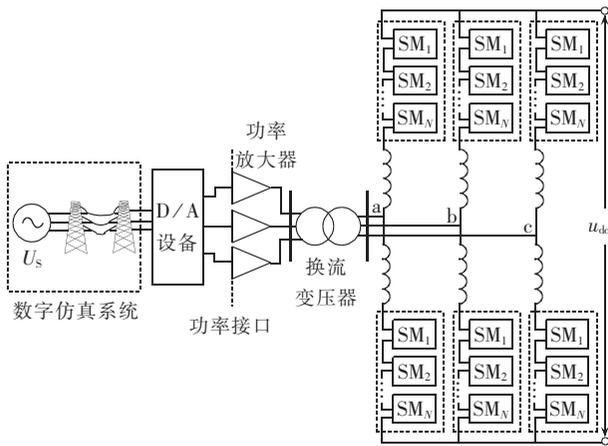


图 5 含 MMC 的数模混合仿真系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of digital-analog hybrid simulation system with MMC

3.2 MMC 等效模型建立

在电磁暂态仿真中,理想情况下每个处于投入状态的 MMC 子模块均可等效为一个电阻 R_0 和一个电容 C_0 串联^[19],因此,当 MMC 处于 STATCOM 稳态运行时其单相的工作状态如图 6 中长、短虚线回路所示。其中 N_{1a} 、 N_{2a} 、 N_{1b} 和 N_{2b} 分别表示任意时刻 a 相和 b 相上、下桥臂处于投入状态的子模块个数; L_0 为桥臂电抗器电感; L_T 为换流变电感。此时 MMC 上、下桥臂等效于 2 个悬浮双星形拓扑结构,其等效电路为上桥臂处于投入状态子模块的等效电阻、电容和桥臂电抗器串联再与相应的下桥臂并联,最后再与换流变漏抗串联。

当电平数为 $N + 1$ 时,其稳态运行任一时刻每

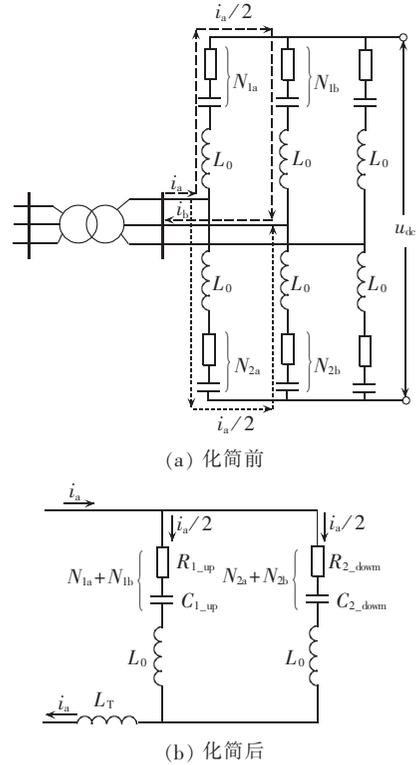


图 6 STATCOM 模式下 MMC 等效电路图

Fig.6 Equivalent circuit diagram of MMC in STATCOM mode

一个相单元的上下桥臂处于投入状态的子模块个数之和始终为 N ,由于电流均分,进而可得 $N_{1a} + N_{1b} = N_{2a} + N_{2b} = N$ 。

由图 6(b)可得 STATCOM 模式下 MMC 任一稳态运行时刻,理想情况下其单相回路均可等效为电阻、电感和电容的串联电路^[20]。另外,将数字侧等效为一个理想电压源 U_s 和短路阻抗 R_1 、 L_1 串联,从而可得工作于 STATCOM 模式下 MMC 的数模混合仿真等效电路如图 7 所示。

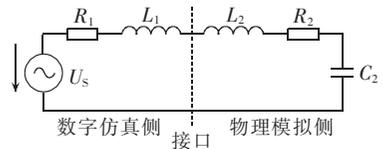


图 7 STATCOM 模式 MMC 的数模混合等效电路

Fig.7 Equivalent digital-analog hybrid circuit of MMC in STATCOM mode

4 算例及仿真验证

4.1 参数选择

数字侧电压源取额定电压 110kV,物理侧直流输电系统额定容量为 1000MW,取系统短路容量比为 1,则交流系统短路容量在 110kV 母线处短路容量为 1000MV·A。交流输电线路等效电抗与电阻的比值系数取经验值 $X/R=10$,系统频率为 $f=50\text{Hz}$ 。物理侧的参数如下^[21]: $L_0=98\text{mH}$, $R_0=0.00568\Omega$,

$C_0=8800\mu\text{F}, L_T=38.5\text{mH}$ 。

结合 3.2 节分析过程计算得到数模混合仿真各元件参数如下:数字侧等效阻抗参数 $R_1=1.204\Omega$, $L_1=38.3\text{mH}$;物理侧 RLC 等效参数 $R_2=1.1364\Omega$, $L_2=87.5\text{mH}, C_2=44\mu\text{F}$ 。

系统延时主要来自于功率接口设备和信号采集设备,目前商用功率放大器延时基本为 $2\sim 20\mu\text{s}$,按最不利情况考虑,取 $T_{d1}=19\mu\text{s}, T_{d2}=1\mu\text{s}$ 。延时补偿环节对应参数取如下经验值: $G=1, T_1=0.00001, T_2=0.001$ 。

4.2 仿真验证

按照图 7 所示电路图在 PSCAD 中搭建对应数模混合仿真等效电路图,并利用电压型理想变压器算法对其进行解耦,如图 8 所示。

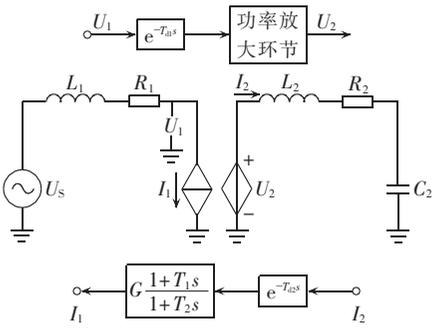


图 8 基于电压型 ITM 算法数模混合等效电路图

Fig.8 Equivalent circuit diagram of digital-analog hybrid simulation based on voltage-type ITM algorithm

为了验证 Routh 判据用于推导接口稳定性必要条件的正确性,将 4.1 节中 $R_1、L_1、R_2、L_2、C_2$ 的数据代入仿真模型,仿真运行结果显示系统是稳定的,如图 9 所示。

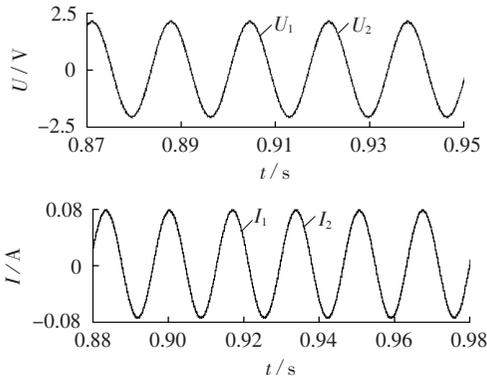


图 9 系统稳定运行结果图

Fig.9 Results of stable system operation

按照 Routh 判据推导结果,通过调整物理侧电感 $L_2=28.75\text{mH}$ 时,系统达到临界失稳状态,仿真结果如图 10 所示。

在系统临界失稳前提下,按本文提出的方法加入延时补偿环节,再次运行系统恢复稳定,见图 11。

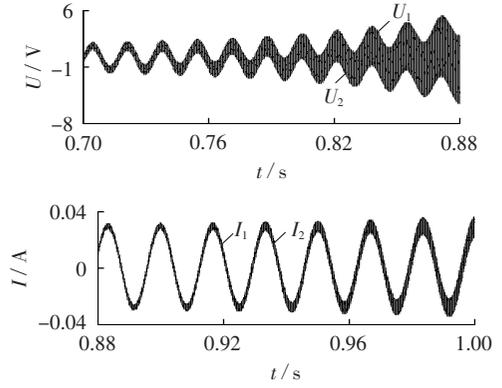


图 10 系统失稳结果图(没有延时补偿)

Fig.10 Results of unstable system operation (without time-delay compensation)

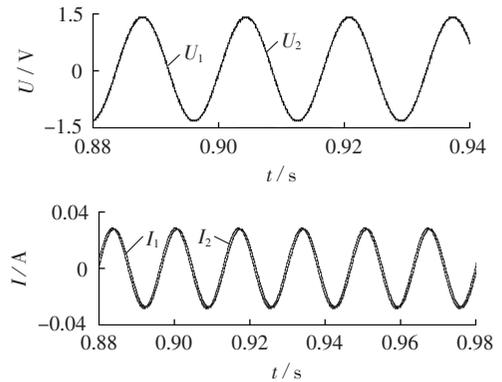


图 11 系统稳定运行结果图(增加延时补偿)

Fig.11 Results of stable system operation (with time-delay compensation)

仿真对比结果证明了该延时补偿技术有利于提高数模混合仿真系统接口的稳定性,也证明了利用 Routh 判据分析系统稳定条件的正确性。

5 结论

本文基于电压型 ITM 算法功率连接技术,利用 Routh 判据给出了 MMC 数模混合功率接口稳定的必要条件。为了改善接口的稳定性,提出了基于 MMC 数模混合仿真的功率延时补偿技术。针对 401 电平 MMC 数模混合仿真的工程实际,本文建立了用于功率接口稳定性分析 MMC 数学模型,并在给定工程实际参数下实现了 PSCAD/EMTDC 离线仿真验证。仿真结果表明了 Routh 判据推导数模混合仿真功率接口稳定条件的正确性以及延时补偿技术对改善数模混合仿真接口稳定性的有效性。下一步将在实际功率接口系统对提出的稳定条件和延时补偿技术进行测试验证。

参考文献:

- [1] 刘栋,汤广福,贺之渊,等. 模块化多电平柔性直流输电数字-模拟混合实时仿真技术[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):68-73.
LIU Dong,TANG Guangfu,HE Zhiyuan,et al. Hybrid real-time

- simulation technology for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2):68-73.
- [2] 周俊,郭剑波,朱艺颖,等. 特高压交直流电网数模混合实时仿真系统[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9):18-22.
ZHOU Jun, GUO Jianbo, ZHU Yiyong, et al. Digital-analog hybrid real-time simulation system of UHVDC and UHVAC power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9):18-22.
- [3] 胡涛,朱艺颖,张星,等. 全数字实时仿真装置与物理仿真装置的功率连接技术[J]. 电网技术, 2010, 34(1):51-55.
HU Tao, ZHU Yiyong, ZHANG Xing, et al. Power connection technology for full-digital real-time simulator and analogue simulator[J]. Power System Technology, 2010, 34(1):51-55.
- [4] 郭剑波,周俊,郭强,等. 华北—华中—华东交直流输电系统数模混合仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(9):55-59.
GUO Jianbo, ZHOU Jun, GUO Qiang, et al. Digital and analog hybrid simulation of interconnected UHVAC/UHVDC transmission system from North China via Central China to East China [J]. Power System Technology, 2011, 35(9):55-59.
- [5] 朱艺颖,董鹏,谢国平,等. 适应大规模风电外送的特高压直流协调控制实时仿真研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7):1814-1819.
ZHU Yiyong, DONG Peng, XIE Guoping, et al. Real-time simulation of UHVDC cooperative control suitable to large-scale wind farms [J]. Power System Technology, 2013, 37(7):1814-1819.
- [6] 胡涛,朱艺颖,印永华,等. 含多回物理直流仿真装置的大电网数模混合仿真建模及研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7):68-75.
HU Tao, ZHU Yiyong, YIN Yonghua, et al. Modeling and study of digital/analog hybrid simulation for bulk grid with multi-analog HVDC simulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7):68-75.
- [7] 陈磊,闵勇,叶俊,等. 数字物理混合仿真系统的建模及理论分析(一)系统结构与模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23):9-13.
CHEN Lei, MIN Yong, YE Jun, et al. Modeling and theoretical analysis of hardware-in-the-loop simulation part one structure and model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23):9-13.
- [8] 周俊,郭剑波,郭强,等. 电力系统功率连接装置接口稳定性问题及其改进措施[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8):42-46.
ZHOU Jun, GUO Jianbo, GUO Qiang, et al. Interface stability of power interconnection derive in electric power systems and improvement measures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8):42-46.
- [9] 董鹏,朱艺颖,吕虎,等. 特高压电网建设初期“三华”电网数模混合实时仿真试验研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1):18-25.
DONG Peng, ZHU Yiyong, GUO Hu, et al. Digital-analog hybrid real-time simulation for primary stage of North China-Central China-East China UHV power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(1):18-25.
- [10] 朱艺颖,董鹏,胡涛,等. 大规模“风火打捆”经直流外送数模混合仿真系统[J]. 电网技术, 2013, 37(5):1329-1334.
ZHU Yiyong, DONG Peng, HU Tao, et al. A digital-analog hybrid simulation system for sending out massive thermal-generated power bundled with wind power via HVDC transmission system [J]. Power System Technology, 2013, 37(5):1329-1334.
- [11] 刘一欣,郭力,李霞林,等. 基于实时数字仿真的微电网数模混合仿真实验平台[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2):82-91.
LIU Yixin, GUO Li, LI Xialin, et al. Real-time digital simulator based digital-analog hybrid simulation experimental platform for a microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2):82-91.
- [12] REN W, STEUER M, BALDWIN T. Improve the stability and the accuracy of power hardware-in-the-loop simulation by selecting appropriate interface algorithms[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(4):1286-1294.
- [13] 邵敏. 大电网-微网数模混仿接口算法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.
SHAO Wen. Research on interface algorithms of grid-microgrid hardware-in-the-loop simulation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [14] 刘东,张炳达. 变电站培训仿真一次系统的实时数字仿真[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8):103-107.
LIU Dong, ZHANG Bingda. Real-time digital simulation of substation training and simulation primary system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8):103-107.
- [15] REN W. Accuracy evaluation of Power Hardware In the Loop (PHIL) simulation [D]. Tallahassee, USA: The Florida State University, 2007.
- [16] 朱艺颖,蒋卫平,印永华,等. 电力系统数模混合仿真技术及仿真中心建设[J]. 电网技术, 2008, 32(22):35-38.
ZHU Yiyong, JIANG Weiping, YIN Yonghua, et al. General situation of power system hybrid simulation center [J]. Power System Technology, 2008, 32(22):35-38.
- [17] 钱路江,叶飞,钟启迪. 数字-物理模型互联方法及混合仿真系统稳定性研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9):45-48.
QIAN Lujiang, YE Fei, ZHONG Qidi. Interfacing between digital and analog models and stability of hybrid simulation system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9):45-48.
- [18] 刘云,蒋卫平,印永华,等. 特高压交直流大电网的数模混合实时仿真系统建模[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12):52-56.
LIU Yun, JIANG Weiping, YIN Yonghua, et al. Modeling of analogue-digital hybrid real-time simulation system applied in the UHV AC/DC great power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12):52-56.
- [19] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2012:273-280.
- [20] YOO I D, GOLE A M. Compensating for interface equipment limitations to improve simulation accuracy of real-time power hardware in loop simulation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3):1284-1291.
- [21] 中电普瑞电力工程有限公司. MMC-HVDC 实时仿真系统方案设计[R]. 北京:国网智能电网研究院, 2012.

作者简介:



李国庆

李国庆(1963—),男,吉林长春人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统的安全性与稳定性分析、控制与决策、配电系统自动化(E-mail:LGQ@mail.njtu.edu.cn);

谷怀广(1986—),男,河北邯郸人,硕士研究生,研究方向为柔性直流输电系统数模混合仿真(E-mail:guhuaiguang@sgrj.sgcc.com.cn);

吴学光(1966—),男,云南元谋人,教授,博士,研究方向为大规模新能源发电和并网、超高压直流输电技术(E-mail:wuxueguang@sgrj.sgcc.com.cn);

刘栋(1982—),男,安徽宿州人,工程师,博士,研究方向为高压直流输电混合仿真(E-mail:liudong@sgrj.sgcc.com.cn)。

Analysis of MMC power interface stability and improvement measures

LI Guoqing¹, GU Huaiguang¹, WU Xueguang², LIU Dong²

(1. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Smart Grid Research Institute, SGCC, Beijing 102211, China)

Abstract: In order to improve the power interface stability of digital-analog hybrid simulation for MMC (Modular Multilevel Converter), the Routh stability criterion is adopted to derive the necessary conditions of stable interface for the hybrid simulation system based on the interface algorithm of voltage-type ITM (Ideal Transformer Model). A digital technology is proposed to compensate the time delay induced by the interface devices, such as the power amplifier. The equivalent model of MMC in the STATCOM mode is established and the PSCAD simulation software is applied to realize the digital-analog hybrid simulation based on the voltage-type ITM for the 401-level MMC. Simulative results show that, the application of Routh stability criterion as the condition of stable power interface in the digital-analog hybrid simulation is correct and the proposed digital technology for compensating the time delay is effective.

Key words: MMC; hybrid simulation; interface algorithm; Routh criterion; time-delay compensation; stability

(上接第 4 页 continued from page 4)

[16] 吕志鹏, 刘海涛, 苏剑, 等. 可改善微网电压调整的容性等效输出阻抗逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 1-8.

LÜ Zhipeng, LIU Haitao, SU Jian, et al. Micro-source inverters with capacitive equivalent output impedance for improving micro-grid voltages[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 1-8.

[17] SHEN G Q, XU D H, CAO L P, et al. An improved control strategy for grid-connected voltage source inverter with an LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 1899-1906.

作者简介:



曹一家

曹一家(1969—), 男, 湖南益阳人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 从事电力系统稳定与控制、电力市场与信息技术(IT)、复杂系统的智能控制方面的研究(E-mail: yjcao@hnu.edu.cn);

郑玉芳(1990—), 女, 福建泉州人, 硕士研究生, 从事新能源发电技术、微电网技术方面的研究(E-mail: zyfcsu@163.com)。

Weakly-constrained control of microgrid inverter with capacitive equivalent output impedance

CAO Yijia¹, ZHENG Yufang¹, YU Jingrong², DUAN Juanfeng¹, ZHANG Wenyuan¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: As most inverters have the inductive output impedance at low frequencies, a strategy of inverter control, including the LCCL filter configuration, sampling current selection and virtual impedance controller design, is proposed to make its output impedance capacitive by providing a controllable degree of freedom for its output impedance model, which splits the capacitor of LCL filter into two parts and takes the current flowing between them as the sampling current to effectively reduce the order of current control system. The inductors and capacitors of LCCL filter are properly configured to achieve a reasonable virtual impedance controller for making the inverter equivalent output impedance capacitive. The effectiveness of the proposed control strategy is verified by the simulative results.

Key words: microgrid; electric inverters; capacitive inverter; LCCL filter; virtual impedance